

Научная статья
УДК 625.76.08
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>
EDN: RBLXHW



СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОХОДНЫХ РЕВЕРСИВНЫХ ВИБРОПЛИТ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.А. Афанасьев ✉, И.С. Тюремнов

Ярославский государственный технический университет,
г. Ярославль, Россия

✉ ответственный автор
afanasiev.m.a2016@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Реверсивные виброплиты – грунтоуплотняющие машины с плоским рабочим органом, оснащенные двумя и более дебалансными валами и обладающие возможностью реверсирования направления и скорости передвижения. Для привода реверсивных виброплит могут применяться бензиновые, дизельные или электрические двигатели. Эффективная работа реверсивных виброплит возможна только при рациональном подборе технических характеристик, а именно: частоты колебаний и вынуждающей силы вибровозбудителя, ширины основания, мощности двигателя и т.д. Чтобы установить взаимосвязь между техническими характеристиками реверсивных виброплит, оценить влияние типа двигателя на основные параметры, а также выявить направления совершенствования данного вида техники, был выполнен статистический анализ.

Материалы и методы. Были рассмотрены 484 модели реверсивных виброплит. Информация о моделях взята с официальных сайтов производителей и дилеров. Обработка данных выполнена в программе Microsoft Excel.

Результаты. Определены диапазоны изменения основных параметров, а также получены уравнения регрессии взаимосвязей частоты колебаний вибровозбудителя, вынуждающей силы, ширины основания, мощности двигателя, относительной вынуждающей силы и массы реверсивных виброплит. Для каждой регрессионной зависимости получены коэффициенты детерминации. Исследовано влияние типа двигателя на диапазоны изменения основных параметров реверсивных виброплит.

Заключение. Тип двигателя практически не влияет на значения параметров реверсивных виброплит в соответствующих диапазонах масс. Относительно невысокие значения коэффициентов детерминации позволяют сделать предположение о том, что производители не обладают достоверными методиками для обоснования технических характеристик реверсивных виброплит. Полученные зависимости могут быть рекомендованы для обоснования некоторых технических характеристик реверсивных виброплит. В последние десятилетия существенно возросли значения частоты колебаний и относительной вынуждающей силы, что оказывает влияние на характер взаимодействия реверсивных виброплит с грунтом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: виброплита, вибрация, уплотнение, грунт, анализ статистический, виброплита реверсивная, частота колебаний, вынуждающая сила, мощность двигателя, ширина основания, относительная вынуждающая сила, масса

БЛАГОДАРНОСТИ: авторы выражают благодарность редакции журнала «Вестник СибАДИ» и рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 30.12.2023; одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных реверсивных виброплит с различными типами двигателей // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 814-825. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>

© Афанасьев М.А., Тюремнов И.С., 2024



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>

EDN: RBLXHW

STATISTICAL ANALYSIS OF TECHNICAL SPECIFICATIONS OF SELF-PROPELLED REVERSIBLE PLATE COMPACTORS WITH DIFFERENT TYPES OF ENGINES

Mikhail A. Afanasev ✉, Ivan S. Tyuremnov

Yaroslavl State Technical University,

Yaroslavl, Russia

✉ corresponding author
afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. Reversible plate compactors are soil compaction machines with a flat operating device, having two or more unbalanced shafts and ability to reverse the direction and movement speed.

Reversible plate compactors may be driven by gasoline, diesel or electric engines.

The efficient operation of reversible plate compactors is only possible with the rational selection of technical specifications, such as oscillation frequency and driving force of the vibration exciter, base plate width, engine power, etc. To establish correlations between the technical specifications of reversible plate compactors, to assess the influence of the engine type on the main parameters and to identify the areas for improving this type of equipment, the statistical analyses was conducted.

Materials and methods. 484 models of reversible plate compactors were scrutinized. The information on the models were obtained from official websites of plate compactors manufacturers and their dealers. Data processing was performed in Microsoft Excel.

Results. The variation ranges of the main parameters were determined and regression equations for correlations between the oscillation frequency of the vibration exciter, the driving force, the width of the base plate, the relative exciting force and the mass of reversible plate compactors were derived. Correlation coefficients were obtained for each regression dependence. The influence of the engine type on the variation range of reversible plate compactors' main parameters was analyzed.

Conclusion. The type of engine has almost no effect on the parameters of reversible plate compactors in the corresponding mass ranges. Relatively low correlation coefficients let us suggest that manufacturers do not have reliable methods for justification of the technical specifications of reversible plate compactors. The obtained correlations may be recommended for verification of some technical specifications of reversible plate compactors. In recent decades, the values of oscillation frequency and relative exciting force have increased significantly, which affects the nature of interaction between a reversible plate compactor and soil.

KEYWORDS: plate compactor, vibration, compaction, soil, statistical analysis, reversible plate compactor, oscillation frequency, exciting force, engine power, base plate width, relative exciting force, mass

ACKNOWLEDGEMENTS. The authors express their gratitude to The Russian Automobile and Highway Industry Journal editorial board and the reviewers of the article.

The article was submitted: 31.12.2023 approved after reviewing: 11.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Statistical analysis of technical specifications of self-propelled reversible plate compactors with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 814-825. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-814-825>

© Afanasev M.A., Tyuremnov I.S., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Самоходные виброплиты относятся к средствам малой механизации и предназначены для послойного уплотнения грунтов слоями небольшой толщины. Они используются на тех видах работ, где затруднено применение других видов грунтоуплотняющих машин: в пазах фундаментов, в траншеях, на небольших площадках, при частом перемещении между участками проведения работ и т.д. Некоторые исследователи предлагают рассматривать реверсивные виброплиты как альтернативу легким и средним вибрационным каткам (таблицы 1, 2) [1, 2].

В зависимости от механизма передвижения выделяют самоходные неревверсивные и реверсивные виброплиты.

Самоходные реверсивные виброплиты (далее виброплиты) – это самоходные грунтоуплотняющие машины (ГУМ) с плоским рабочим органом, оснащенные вибровозбудителем направленного действия, содержащим два или более дебалансных вала. Самоходность таких машин обеспечивается смещением фазы вращения дебалансов, что приводит к появлению горизонтальной составляющей вынуждающей силы. В зависимости от фазы вращения дебалансов реверсивные виброплиты способны двигаться вперед, назад или уплотнять грунт на одном месте. Реверсивные виброплиты мо-

гут оснащаться бензиновым, дизельным или электрическим двигателем.

Существующие исследования затрагивают широкий перечень вопросов, связанных с работой виброплит. В них рассматриваются задачи по обеспечению вибрационной безопасности оборудования [3], способы снижения стоимости и повышения производительности [4, 5], возможности по использованию виброплит вблизи зданий [6]. Важной темой исследований является внедрение методов контроля качества уплотнения и разработка систем «интеллектуального» уплотнения, применяемых для различных видов ГУМ [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Цель данного исследования – анализ зависимостей между техническими характеристиками реверсивных виброплит для совершенствования методик их проектирования. При анализе учитывались основные параметры реверсивных виброплит, к которым относятся: масса (M , кг), вынуждающая сила (P , кН) и частота колебаний (f , Гц). Кроме абсолютного значения вынуждающей силы P , для каждой плиты была рассчитана относительная вынуждающая сила, которая определялась как отношение вынуждающей силы P к весу виброплиты Q , т.е. P/Q . Этот параметр необходим для определения характера взаимодействия рабочего органа с уплотняемым грунтом.

Таблица 1
Технологические возможности реверсивных виброплит при уплотнении различных видов грунта [2]

Table 1
Technological capabilities of reversible plate compactors for compressing different types of soil [2]

Масса реверсивных виброплит, кг	Толщина уплотняемого слоя (м) / производительность (м ³ /ч)		
	Песок	Супесь	Суглинок
120–130	0,3/15	0,25/12	0,15/8
200–240	0,35/20	0,3/15	0,2/10
400–480	0,45/30	0,35/20	0,25/15
650–700	0,6/80	0,45/60	0,3/30

Таблица 2
Технологические возможности одновальцовых вибрационных катков при уплотнении различных видов грунта [2]

Table 2
Technological capabilities of single drum vibratory rollers for compaction of different types of soil [2]

Масса одновальцовых катков, т	Толщина уплотняемого слоя (м) / производительность (м ³ /ч)		
	Песок	Супесь	Суглинок
2,5–2,6	0,3/80	0,2/60	0,1/30
3,5–4,0	0,35/100	0,25/80	0,12/40
6,0–6,5	0,4/160	0,3/120	0,15/60

Таблица 3
 Диапазоны изменения параметров реверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Table 3
 Ranges of parameter changes of reversible plate compactors
 Source: compiled by the authors.

Параметр	Тип двигателя		
	Бензиновый	Дизельный	Электрический
Масса плиты М, кг	54...1170		
	54...670	110...1170	81...212
Вынуждающая сила Р, кН	8,2...130		
	8,2...100	20...130	12...30
Частота колебаний, Гц	30,5...117		
	60...117	30,5...100	81...108
Мощность двигателя, кВт	1,8...21		
	1,8...15,5	3,1...21	1,8...4
Ширина основания, мм	310...1202		
	310...890	325...1202	350...500
Относительная вынуждающая сила Р/Q	7,66...42,18		
	9,9...34,82	7,66...42,18	14,43...15,6

Также в статистическом анализе рассматривалась мощность двигателя виброплит, поскольку этот параметр влияет как на экономические (текущие затраты на эксплуатацию оборудования), так и на технологические (преодолеваемый уклон) показатели.

Размеры основания виброплиты влияют на глубину уплотнения, достигаемую плотность и производительность¹. Увеличение ширины основания приводит к увеличению ширины полосы уплотнения, но при этом снижаются контактные давления. Поэтому данный параметр также рассматривался при анализе.

Существуют исследования, в которых проводится анализ технических характеристик виброплит [19, 20, 21, 22, 23]. Однако известные работы не охватывают современные виброплиты [19], используют ограниченную выборку рассматриваемых моделей и не учитывают различий в технических характеристиках виброплит с разным типом двигателей [20, 21, 22, 23].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информация о характеристиках реверсивных виброплит бралась с официальных сайтов компаний-производителей, а также с сай-

тов их дилеров. Для статистического анализа использовалась программа Microsoft Excel.

В рамках статического анализа были рассмотрены 484 модели отечественных (Вибромаш, Красный маяк, Сплитстоун, Техком и др.) и зарубежных (ALTECO, AMMANN, Batmatic, Belle, BOMAG, Chicago Pneumatic, Diam, Dynapac, Enar, Euro Shatal, Excalibur, FoxWeld, Helmut, Husqvarna, Huter, Impulse, KOMAN, Lifan, Lumag, MBW, Mikasa, NTC, Vibromax, Wacker Neuson, Weber, Zitrek и др.) реверсивных виброплит, среди которых две модели произведены на территории СНГ (Россия, Беларусь), 167 – в КНР и 315 – в других странах (Великобритания, Германия, Израиль, Испания, Италия, США, Франция, Чехия, Швейцария, Швеция, Южная Корея, Япония).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунках 1, 2, 3, 4, 5 изображены графические представления, показывающие взаимосвязь массы виброплиты (М, кг) с мощностью двигателя (N, кВт), вынуждающей силой (Р, кН), частотой колебаний (f, Гц), относительной вынуждающей силой (Р/Q) и шириной опорной поверхности (В, мм). В таблице 3 приведены диапазоны изменения указанных параметров.

¹ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

Таблица 4
Влияние типа двигателя на технические характеристики реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 4
Influence of engine type on technical specifications of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

Модель виброплиты	Вынуждающая сила вибратора, кН	Частота вибрации, Гц	Ширина основания, мм	Мощность двигателя, кВт	Эксплуатационная масса, кг	Длина основания, мм	Скорость движения, см/с	Модель двигателя	Топливо
Batmatic CR2140	21	90	400	4,8	113	632	50	Kohler SH265	Бензин
	21	90	400	3,5	121	632	50	Kohler 15D225	Д/т
Belle RPX 35/40	35	81	400	4,3	176	700	45	Honda GX200	Бензин
	35	81	400	3,6	187	700	45	Hatz 1B20	Д/т
BOMAG BPR 25/40	25	85	400	3,6	135	650	42	Honda GX160	Бензин
	25	85	400	3,1	150	650	42	Hatz 1B20	Д/т
Euro Shatal 2414-50	24	92	500	4	149	642	33	Honda GX160	Бензин
	24	92	500	3,3	164	642	33	Hatz 1B20	Д/т
Husqvarna LG400	52	60	650	8,2	398	–	42	Honda GX390	Бензин
	52	60	650	7,2	434	–	42	Kohler KD15-440	Д/т
NTC VDR63	63	74	680	8,7	430	–	43	Honda GX390	Бензин
	63	74	680	7,9	450	–	43	Hatz 1B50	Д/т
Wacker Neuson DPU 3750	37	90	500	5,1	247	–	–	Honda GX270	Бензин
	37	90	500	4,2	265	–	–	Hatz 1B30	Д/т
Weber MT CR7	65	74	650	8,7	397	–	40	Honda GX390	Бензин
	65	74	650	7,5	475	–	40	Hatz 1B40	Д/т

Анализ результатов, представленных на рисунках 1, 2, 3, 4, 5, показывает, что тип двигателя влияет на основные параметры реверсивных виброплит. В частности, использование дизельного двигателя при прочих равных условиях приводит к увеличению массы оборудования и снижению мощности. Особенно это заметно при анализе характеристик моделей, для которых доступны как бензиновые, так и дизельные модели двигателей (таблица 4).

Среди реверсивных виброплит представлено всего 3 модели с электрическим двигателем. Такой выборки недостаточно для установления каких-либо значимых зависимостей. Однако стоит отметить, что по всем основным

параметрам электрические реверсивные виброплиты укладываются в диапазон параметров бензиновых моделей.

Вынуждающая сила реверсивных виброплит возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 1). При этом линия регрессии для дизельных моделей практически совпадает с линией регрессии для бензиновых моделей в соответствующих диапазонах масс.

Характерным является наличие ряда дискретных значений вынуждающей силы (30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 и 65 кН) для определенных диапазонов масс виброплит с различными типами двигателей.

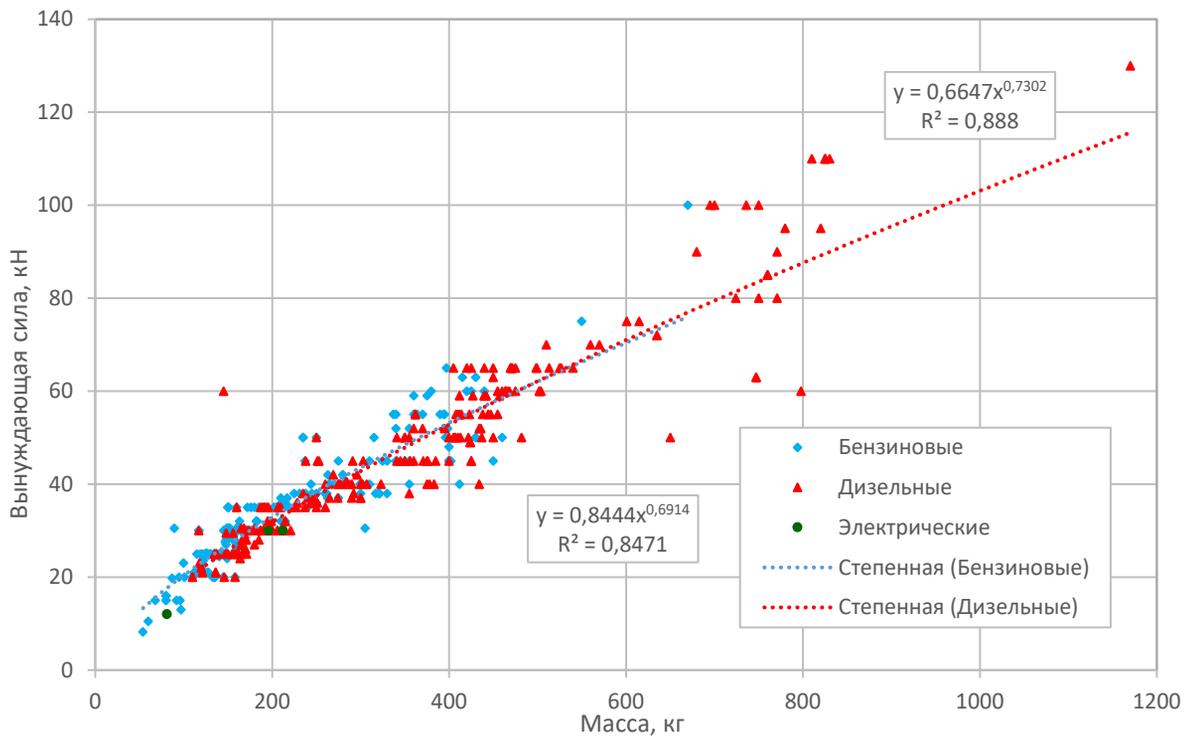


Рисунок 1 – Соотношение между массой (M , кг) и вынуждающей силой (P , кН) реверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Correlation between mass (M , kg) and exciting force (P , kN) of reversible plate compactors
 Source: compiled by the authors.

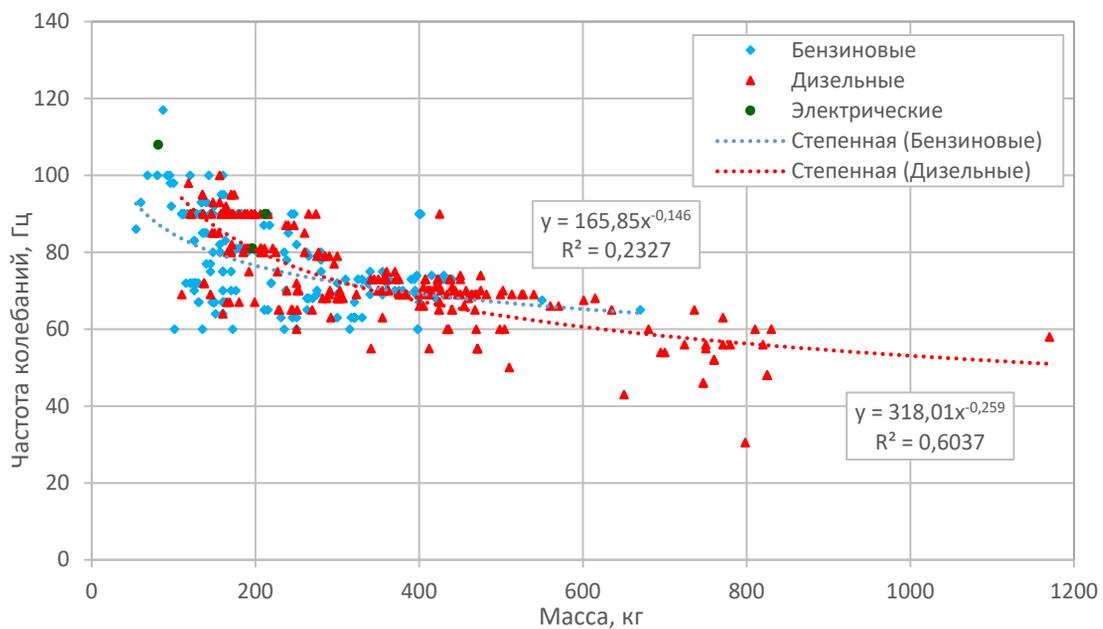


Рисунок 2 – Соотношение между массой (M , кг) и частотой колебаний (f , Гц) реверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Correlation between mass (M , kg) and oscillation frequency (f , Hz) of reversible plate compactors
 Source: compiled by the authors.

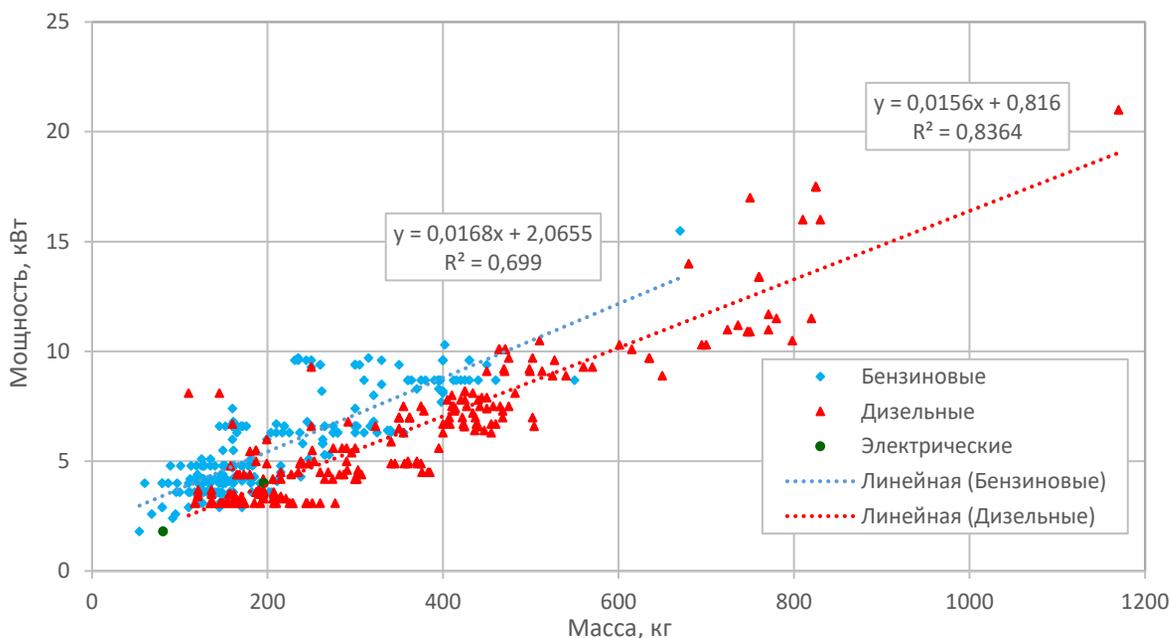


Рисунок 3 – Соотношение между массой (M , кг) и мощностью двигателя (N , кВт) реверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Correlation between mass (M , kg) and engine power (N , kW) of reversible plate compactors
 Source: compiled by the authors.

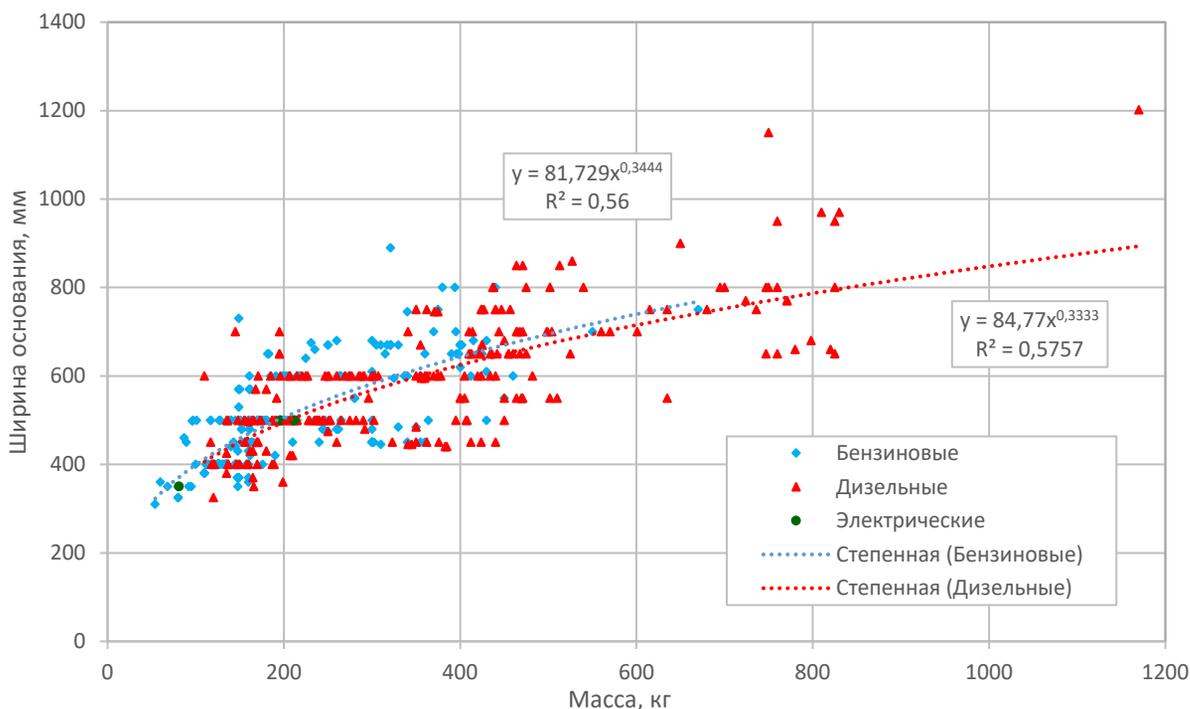


Рисунок 4 – Соотношение между массой (M , кг) и шириной основания (B , мм) реверсивных виброплит
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Correlation between mass (M , kg) and base plate width (B , mm) of reversible plate compactors
 Source: compiled by the authors.

Частота колебаний реверсивных виброплит уменьшается с увеличением их массы (см. рисунок 2). Линии регрессии для мощности двигателя бензиновых и дизельных моделей располагаются очень близко друг от друга и имеют схожий характер. Однако частота колебаний бензиновых реверсивных виброплит не опускается ниже 60 Гц, тогда как минимальная частота для дизельных моделей составляет 30,5 Гц.

Мощность двигателя реверсивных виброплит возрастает с увеличением их массы (см. рисунок 3). Линия регрессии для дизельных моделей практически параллельна линии регрессии для бензиновых реверсивных виброплит и смещена от него вправо (в сторону увеличения массы) и вниз (в сторону снижения мощности). То есть при идентичных основных параметрах дизельная виброплита имеет на 4...16% большую массу и на 10...17% меньшую мощность двигателя, что хорошо заметно при анализе характеристик моделей виброплит, выпускающихся как с бензиновым, так и с дизельным двигателем (см. таблицу 4).

Ширина основания реверсивных виброплит с бензиновым и дизельным двигателями воз-

растает с увеличением массы, при этом линии регрессии для виброплит с различными типами двигателей практически совпадают (см. рисунок 4). Наиболее распространена ширина основания, равная 500 мм, – на нее приходится 20% всех моделей. Также часто встречаются виброплиты с шириной основания 600 мм – она представлена у 13% всех моделей. Как правило, ширина основания реверсивных виброплит не превышает 1000 мм. Исключение составляют модели от компаний Masterpac и Wacker Neuson с шириной основания 1150 и 1202 мм соответственно.

Для реверсивных виброплит с бензиновыми и дизельными двигателями диапазоны значений и линии регрессии относительного вынуждающего усилия в целом совпадают в соответствующих диапазонах масс (см. рисунок 5). Следует отметить, что значение относительной вынуждающей силы уменьшается по мере увеличения массы виброплиты.

Наблюдаемое расположение точек по гиперболическим зависимостям обусловлено наличием ряда дискретных значений вынуждающей силы для определенного диапазона масс виброплит (см. рисунок 1).

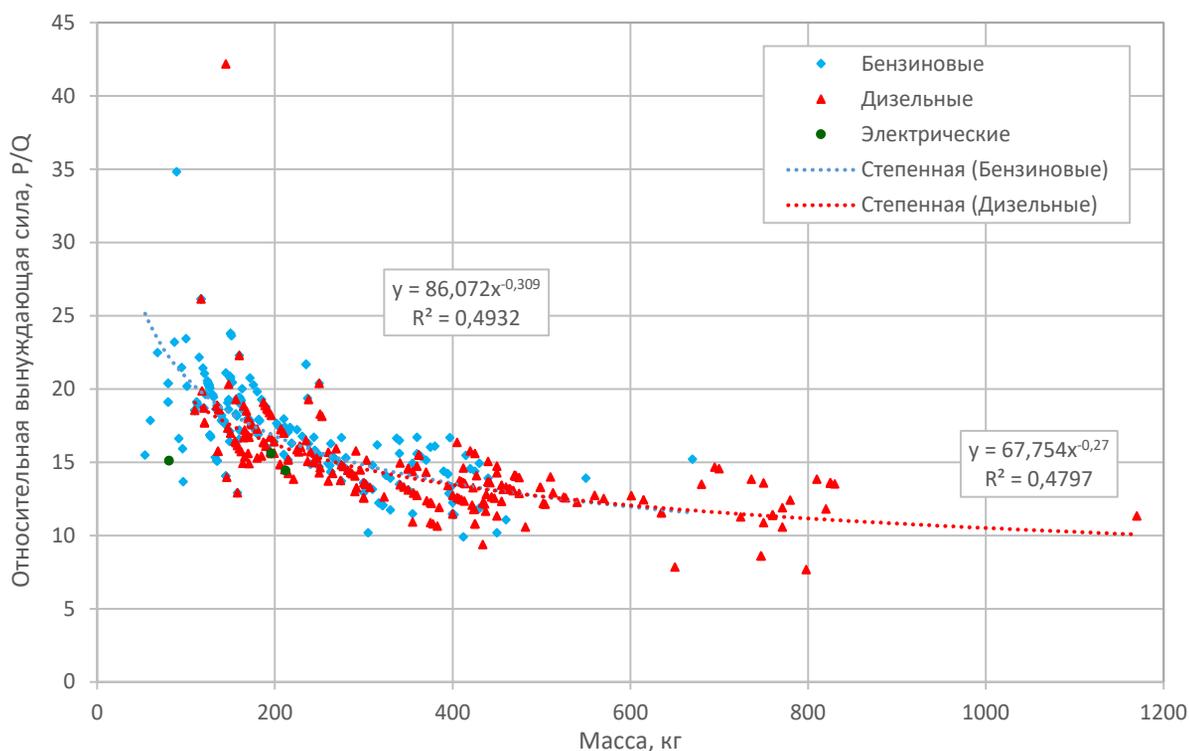


Рисунок 5 – Соотношение между массой (M , кг) и относительной вынуждающей силой (P/Q) реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Correlation between mass (M , kg) and relative exciting force (P/Q) of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

Таблица 5
Уравнения регрессии для различных типов реверсивных виброплит
Источник: составлено авторами.

Table 5
Regression equations for different types of reversible plate compactors
Source: compiled by the authors.

Тип двигателя	Параметр	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R ²
Бензиновые	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,8444M^{0,6914}$	0,8566
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = 165,85M^{-0,146}$	0,2189
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,0168M + 2,0655$	0,699
	Ширина основания (B, мм)	$B = 81,729M^{0,3444}$	0,5772
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 86,072M^{-0,309}$	0,5433
Дизельные	Вынуждающая сила (P, кН)	$P = 0,6647M^{0,7302}$	0,901
	Частота колебаний (f, Гц)	$f = 318,01M^{-0,259}$	0,5935
	Мощность двигателя (N, кВт)	$N = 0,0156M + 0,816$	0,8364
	Ширина основания (B, мм)	$B = 84,77M^{0,3333}$	0,5692
	Относительная вынуждающая сила (P/Q)	$P/Q = 67,754M^{-0,27}$	0,5542

В таблице 5 приведены уравнения регрессии и значения коэффициентов корреляции для зависимостей основных параметров реверсивных виброплит от их массы (M, кг).

ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, для реверсивных виброплит сопоставимой массы в каждой из рассмотренных подгрупп (с дизельными, бензиновыми и электрическими двигателями) наблюдается значительный разброс параметров, который в отдельных случаях достигает двукратных значений. Это, скорее всего, обусловлено тем, что у производителей отсутствует единая методика для обоснования технических характеристик реверсивных виброплит для использования в заданных условиях, т.е. с учетом толщины уплотняемого слоя, требуемого коэффициента уплотнения, типа и влажности грунта.

Дизельные реверсивные виброплиты, при тех же значениях частоты и вынуждающей силы колебаний, а также ширины основания, несколько тяжелее бензиновых, что обуславливается конструктивными особенностями применяемых двигателей. При этом на реверсивных виброплитах массой свыше 670 кг применяются только дизельные двигатели. Электрические двигатели используются в реверсивных виброплитах весьма ограниченно и в диапазоне масс до 212 кг.

Диапазоны значений вынуждающей силы, частоты колебаний, ширины основания и относительной вынуждающей силы бензиновых и дизельных моделей практически совпадают в соответствующих диапазонах масс. При этом установленная мощность дизельных двигателей при тех же значениях ширины основания, частоты и вынуждающей силы колебаний меньше, чем у бензиновых моделей.

За последние годы у реверсивных виброплит существенно выросли значения частоты колебаний вибровозбудителя и относительной вынуждающей силы. Так, в 1960-е годы частоты колебаний вибровозбудителя для виброплит массой 100–1000 кг составляли $f = 30...65$ Гц, а относительная вынуждающая сила находилась в диапазоне $P/Q = 4...12$ [19]. К 2011 г. значения этих параметров достигли $f = 40...80$ Гц и $P/Q = 9...23$ соответственно [23]. В современных моделях реверсивных виброплит частота колебаний вибровозбудителя составляет $f = 30,5...117$ Гц, а относительная вынуждающая сила $P/Q = 7,66...42,18$.

Применяемая в настоящее время зависимость для расчета амплитудных контактных напряжений, предложенная Н.Я. Хархутой, имеет вид²:

$$\sigma_0 = k_{np} \frac{P + Q}{F},$$

² Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

где σ_0 – амплитудные контактные напряжения, Па; P – вынуждающая сила, Н; Q – вес виброплиты, Н; F – площадь опорной поверхности, m^2 ; $k_{пр}$ – коэффициент превышения, зависящий от значений P/Q .

Данная методика применима только для диапазона значений³ относительной вынуждающей силы $P/Q = 2...12$. Таким образом, применение формулы для современных реверсивных виброплит существенно ограничивается в связи с изменением диапазона значений P/Q , который для современных реверсивных виброплит равен $P/Q = 7,66...42,18$. Также желателен учет частоты колебаний и характеристик уплотняемого грунта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при выполнении дальнейших исследований по оценке технологических возможностей виброплит нет необходимости выделять реверсивные виброплиты с бензиновым, дизельным и электрическим двигателем. Однако тип двигателя является важным фактором при решении задач, связанных с повышением энергоэффективности грунтоуплотняющих машин. Также следует учитывать, что реверсивным виброплитам с различными типами двигателей соответствуют несколько различные диапазоны масс и различные соотношения массы основания виброплиты и массы рамы с двигателем, выступающим в роли пригруза и ограничивающим колебания основания виброплит. Это имеет значение при разработке реологических моделей реверсивных виброплит.

Существенный разброс технических характеристик и невысокий коэффициент детерминации большинства полученных регрессионных зависимостей позволяют сделать вывод о том, что производители не имеют единой методики обоснования технических характеристик реверсивных виброплит. Данная ситуация вызвана рядом объективных факторов. В частности, виброударным характером колебаний реверсивных виброплит, обусловленным тем, что относительная вынуждающая сила виброплиты существенно (в 6,6–11,4 раз) превышает критические значения, установленные Н.Я. Хархутой⁴. Это также приводит к тому, что частота вращения дебалансных валов может не совпадать с частотой циклов приложения

нагрузки к грунту и превышать последнюю в 2 и более раза, что значительно усложняет моделирование взаимодействия виброплиты с грунтом, но требует обязательного учета при построении математической модели работы реверсивной виброплиты.

Также не до конца изучены свойства грунтов и процессы, происходящие в грунте при динамическом нагружении его поверхности. Данные факторы затрудняют прогнозирование результатов уплотнения грунта виброплитами и приводят к ситуации, когда производители используют для обоснования технических характеристик виброплит метод проб и ошибок, что отражается в широком разбросе основных параметров виброплит сопоставимой массы и ограниченным рекомендациям по технологическим возможностям выпускаемых виброплит [24].

Полученные в настоящем исследовании зависимости могут быть полезны при обосновании отдельных технических характеристик (вынуждающей силы, потребляемой мощности) реверсивных виброплит с различными типами двигателя.

Высокие значения вынуждающей силы на отдельных моделях реверсивных виброплит связаны с особенностями их конструкции, в частности, с увеличением количества дебалансных валов. Количество дебалансных валов также влияет на равномерность распределения контактных давлений по площади опорной поверхности. Влияние конструктивных особенностей виброплит на их технические характеристики и технологические возможности является темой для отдельного исследования.

Целесообразно также проведение анализа рекомендаций производителей по технологическим возможностям самоходных реверсивных виброплит.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография [Электронный ресурс]. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с.
2. Марышев Б.С. Большие возможности при малой цене. Реверсивные виброплиты // Строительная техника и технологии. 2002. № 1. С. 46–48.

³ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

⁴ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 288 с.

3. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3(35). С. 65–68.
4. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2019. 173. 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.
5. Sawant, Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site. 2021. 10.35291/2454-9150.2021.0099.
6. Czech, Krzysztof & Gosk, Wojciech. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. *Procedia Engineering*. 2017. 189. 478–483. 10.1016/j.proeng.2017.05.077.
7. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 10.1061/40803(187)41.
8. Kaufmann, K. & Anderegg, Roland. GPS-based Compaction Technology. *Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance*. 2008. 287–296.
9. Sivagnanasuntharam, Suthakaran & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. *Construction and Building Materials*. 2023. 393. 10.1016/j.conbuildmat.2023.132031.
10. Ranasinghe, Rajitha & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. *Sensors*. 2023. 23. 7507. 10.3390/s23177507.
11. Owusu-Nimo, Frederick & Peprah-Manu, Daniel & Ayeh, Felix & Charkley, Frederick & Ampadu, Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023. 1–14. 10.1007/s10706-023-02598-z.
12. Hassan, Asem & Nadhum, Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. *Iraqi Geological Journal*. 2023. 56. 144–155. 10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21.
13. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023. 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.
14. Aodah, Haider & Chandra, Satish. *Intelligent Compaction Technology*. 2018.
15. Chen, Chengyong & Chang, Fagang & Li, Li & Dou, Wenqiang & Xu, Changjing. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. *Electronic Research Archive*. 31. 2023. 2775–2792. 10.3934/era.2023140.
16. Xu, Tianyu & Zhou, Zhijun & Yan, Ruipeng & Zhang, Zhipeng & Zhu, Linxuan & Chen, Chaoran & Fu, Xu & Liu, Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. *Sensors*. 2020. 20. 4288. 10.3390/s20154288.
17. Zhang, Zhipeng & Zhou, Zhijun & Guo, Tao & Xu, Tianyu & Zhu, Linxuan & Fu, Xu & Chen, Chaoran & Liu, Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. *Measurement Science and Technology*. 2021. 32. 10.1088/1361-6501/abd7ab.
18. Hou, Ziyi & Dang, Xiao & Yuan, Yezhen & Tian, Bo & Li, Sili. (2021). Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. 1–9. 10.1155/2021/4100896.
19. Хархута Н.Я., Андрейченко Ю.Я. Выбор основных параметров виброплит // Строительные и дорожные машины. 1968. № 4. С. 6–8.
20. Мусяйко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибрационная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4(43). С. 73–80.
21. Anderegg, Roland. *Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie*. 2018.
22. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Статистический анализ технических характеристик вибрационных плит // Механизация строительства. 2014. № 11(845). С. 32–35.
23. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3(28). С. 66–71.
24. Тюремнов И.С., Новичихин А.А., Филатов И.С. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных плит для уплотнения грунта // Механизация строительства. 2014. № 12(846). С. 28–32.

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. *Soil compaction by vibrating plates: monograph* [Electronic resource]. Yaroslavl. Izdat. dom YaSTU, 2018: 143. (in Russ.)
2. Maryshev B.S. Great possibilities at a low price. Reversible vibrating plates. *Construction Equipment and Technologies*. 2002; 1: 46–48. (in Russ.)
3. Kuz'michev, V. D. Mathematical model of plate compactors. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2012; 3(35): 65–68. (in Russ.)
4. Massarsch, K. Rainer & Wersäll, Carl. Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2019; 173: 1–30. 10.1680/jgeen.19.00169.
5. Sawant, Rohan. Advance Equipment for Compaction on Site. 2021.10.35291/2454-9150.2021.0099.
6. Czech, Krzysztof & Gosk, Wojciech. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. *Procedia Engineering*. 2017; 189: 478–483. 10.1016/j.proeng.2017.05.077.
7. Anderegg, Roland & Kaufmann, Kuno. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *Geo Congress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. 10.1061/40803(187)41.

8. Kaufmann, K. & Anderegg, Roland. GPS-based Compaction Technology. Proceedings of the 1st *International Conference on Machine Control and Guidance*. 2008: 287–296.
9. Sivagnanasuntharam, Suthakaran & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. A New Approach to Maximising the Benefits of Current Intelligent Compaction Technology for Asphalt Materials. *Construction and Building Materials*. 2023. 393. 10.1016/j.conbuildmat.2023.132031.
10. Ranasinghe, Rajitha & Sounthararajah, Arooran & Kodikara, Jayantha. An Intelligent Compaction Analyzer: A Versatile Platform for Real-Time Recording, Monitoring, and Analyzing of Road Material Compaction. *Sensors*. 2023; 23. 7507. 10.3390/s23177507.
11. Owusu-Nimo, Frederick & Peparah-Manu, Daniel & Ayeh, Felix & Charkley, Frederick & Ampadu, Samuel. Compaction Verification of Lateritic Soil Using Electrical Resistivity: A Laboratory Study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2023: 1–14. 10.1007/s10706-023-02598-z.
12. Hassan, Asem & Nadhum, Gehan. Geotechnical-Electrical Evaluation of Soil Compaction Parameters, South of Baqubah City. *Iraqi Geological Journal*. 2023; 56: 144–155. 10.46717/igj.56.1D.12ms-2023-4-21.
13. Yao, Yangping & Song, Er Bo. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023; 1. 10.1007/s44268-023-00004-4.
14. Aodah, Haider & Chandra, Satish. *Intelligent Compaction Technology*. 2018.
15. Chen, Chengyong & Chang, Fagang & Li, Li & Dou, Wenqiang & Xu, Changjing. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. *Electronic Research Archive*. 2023; 31: 2775–2792. 10.3934/era.2023140.
16. Xu, Tianyu & Zhou, Zhijun & Yan, Ruipeng & Zhang, Zhipeng & Zhu, Linxuan & Chen, Chaoran & Fu, Xu & Liu, Tong. Real-Time Monitoring Method for Layered Compaction Quality of Loess Subgrade Based on Hydraulic Compactor Reinforcement. *Sensors*. 2020; 20. 4288. 10.3390/s20154288.
17. Zhang, Zhipeng & Zhou, Zhijun & Guo, Tao & Xu, Tianyu & Zhu, Linxuan & Fu, Xu & Chen, Chaoran & Liu, Tong. A measuring method for layered compactness of loess subgrade based on hydraulic compaction. *Measurement Science and Technology*. 2021; 32. 10.1088/1361-6501/abd7ab.
18. Hou, Ziyi & Dang, Xiao & Yuan, Yezhen & Tian, Bo & Li, Sili. Research on Intelligent Compaction Technology of Subgrade Based on Regression Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021; 1–9. 10.1155/2021/4100896.
19. Kharkhuta N.Ya., Andreichenko Yu.Ya. Selecting the main parameters of a vibrating plate. *Construction and road machinery*. 1968; 4: 6–8. (in Russ.)
20. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Self-propelled vibrating plate with a roller. *Bulletin of PNU*. 2016; 4(43): 73–80. (in Russ.)
21. Anderegg, Roland. Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie. 2018.
22. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. Statistical analysis of technical characteristics of vibrating plates. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2014; 11(845): 32–35. (in Russ.)
23. Kuz'michev V.A., Kuz'michev V.D. Research of working parameters of self-propelled vibroplates used at ground consolidation. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2011; 3(28): 66–71. (in Russ.)
24. Tyuremnov, I.S., Novichikhin, A.A., Filatov I.S. Review of manufacturers' recommendations on the use of vibrating plates for soil compaction. *Mehanizacija stroitel'stva*. 2014; 12(846): 28. (in Russ.)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Афанасьев М.А. Сбор информации о технических характеристиках виброплит, статистическая обработка данных, подготовка текста статьи.

Тюремнов И.С. Общая организация работы, подготовка текста статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Afanasev M.A. Data collection on the technical specifications of plate compactors, data processing, text writing.

Tyuremnov I.S. General research management, article preparation.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьев Михаил Александрович – аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5095-2557>,

SPIN-код: 8256-8500,

e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru

Тюремнов Иван Сергеевич – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-4153>,

SPIN-код: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afanasev Mikhail A. – Postgraduate student of the Construction and Road Machines Department, Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskiy Proezd, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5095-2557>,

SPIN-code: 8256-8500,

e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru

Tyuremnov Ivan S. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Construction and Road Machines Department, (88, Moskovsky Prospekt, Yaroslavl, 150023).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-4153>,

SPIN-code: 9976-0728,

e-mail: tyuremnovis@yandex.ru